

---

**ANEXO 1:**

**RECURSO EÓLICO**

---



# CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1

Referencia: R20-56-01-01  
Revisión: 0  
Fecha: 10 de febrero de 2021

## CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1

Emitido por Barlovento Recursos Naturales

<b>LABORATORIO:</b>	BARLOVENTO RECURSOS NATURALES, S.L. CIF: B-26264366. C/ Pintor Sorolla, nº 8 1A 26007 LOGROÑO (ESPAÑA) Tel: +34 941 28 73 47. Fax: +34 941 28 73 48. email: <a href="mailto:brn@barlovento-recursos.com">brn@barlovento-recursos.com</a>
<b>PROYECTO:</b>	Proyecto: P.E. Navarra 1 Fecha: 10 de febrero de 2021 Revisión: 0
<b>CLIENTE:</b>	SACYR CONCESIONES RENOVABLES S.L.
<b>MÉTODO:</b>	Recurso eólico: Procedimiento Interno de Barlovento.
<b>PREPARADO POR:</b>	Guillermo Gutiérrez <hr/>
<b>REVISADO POR:</b>	Aurelio Lerena <hr/>
<b>APROBADO POR:</b>	Rafael Zubiaur <hr/>

## CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1

### Listado de documentos y calendario de revisiones

Referencia	Revisión	Título	Comentarios	Fecha
R20-56-01-01	0	CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1		10/02/2021

### Control de copias y distribución

Número de copia	Referencia	Revisión	Distribución
1	R20-56-01-01	0	SACYR CONCESIONES RENOVABLES S.L.
2	R20-56-01-01	0	Barlovento Recursos Naturales

**Número de copia: 1**

---


#### AVISO LEGAL:

Este documento ha sido preparado en nombre de y para uso exclusivo del Cliente. Barlovento Recursos Naturales no aceptará ninguna responsabilidad con respecto al uso de o en relación con este documento por terceras partes.

Si el material provisto por el Cliente o terceras partes (datos, documentos, notas, diagramas, etc.) y utilizados en el informe no pueden ser comprobados, Barlovento no asumirá ninguna responsabilidad ni garantizará la exactitud de los cálculos aquí presentados.

El resultado de este informe sólo puede ser interpretado dentro del contexto completo del informe y bajo la consideración de las observaciones del autor sobre los resultados y las incertidumbres calculadas.

---

	<b>CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1</b>	REFERENCIA R20-56-01-01	REVISIÓN 00
		FECHA 10 de febrero de 2021	Pág. 4 de 25

## ÍNDICE


1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. DESCRIPCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO.....	7
3. METODOLOGÍA.....	10
4. ESTADÍSTICAS PRINCIPALES DEL RÉGIMEN DE VIENTO.....	14
5. EVALUACIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE.....	17
6. AEROGENERADOR.....	18
7. MODELIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE PRODUCCIONES.....	19
8. CONCLUSIONES.....	24

## FIGURAS

FIGURA 1 OROGRAFÍA DE LA ZONA, CURVAS DE NIVEL CADA 10 METROS.....	6
FIGURA 2 UBICACIÓN DEL P.E. NAVARRA 1 (FUENTE: GOOGLE MAPS).....	7
FIGURA 3 IMAGEN AÉREA DEL PROYECTO P.E. NAVARRA 1 Y SUS PARQUES VECINOS, VISTA DESDE EL SUR. (FUENTE: GOOGLE EARTH).....	8
FIGURA 4 USO DE DATOS DEL MODELO WRF (FUENTE: NCAR).....	11
FIGURA 5 ALTIMETRÍA Y POSICIÓN DEL NODO DE INICIALIZACIÓN O MÁSTIL VIRTUAL.....	12
FIGURA 6 DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA Y CONTENIDO ENERGÉTICO DE DIRECCIÓN DE VIENTO EN % EN EL MÁSTIL VIRTUAL MAST 2.....	14
FIGURA 7 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES A 120 METROS EN EL MÁSTIL VIRTUAL MAST 2.....	15
FIGURA 8 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD CON LA ALTURA EN EL MÁSTIL VIRTUAL.....	16
FIGURA 9 DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO WASP A 120 METROS EN EL MÁSTIL VIRTUAL MAST 2.....	20
FIGURA 10 CAMPO DE VIENTOS EN EL EMPLAZAMIENTO A 120 M UTILIZANDO EL MÁSTIL VIRTUAL.....	21

## TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DEL P.E. NAVARRA 1.....	5
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LA CARTOGRAFÍA DIGITAL.....	7
TABLA 3. LONGITUDES DE RUGOSIDAD.....	8
TABLA 4. COORDENADAS DE LOS AEROGENERADORES DEL P.E. NAVARRA 1.....	9
TABLA 5. PUNTO DE TORRE VIRTUAL.....	14
TABLA 6. DISTRIBUCIÓN SECTORIAL DE DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DE VIENTO EN EL MÁSTIL VIRTUAL MAST 2.....	15
TABLA 7. PERFIL VERTICAL ACEPTADO EN EL EMPLAZAMIENTO.....	16
TABLA 8. FUENTE DE DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL AIRE.....	17
TABLA 9. TEMPERATURA, PRESIÓN, HUMEDAD Y DENSIDAD DEL AIRE DEL P.E. NAVARRA 1. .....	17
TABLA 10. AEROGENERADOR.....	18
TABLA 11. CURVA DE POTENCIA DEL AEROGENERADOR PARA LA DENSIDAD 1.11 KG/M <sup>3</sup> .....	18
TABLA 12. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA EVALUADA.....	21
TABLA 13. FACTORES DE CORRECCIÓN Y PÉRDIDAS DE PRODUCCIÓN ESPERADAS.....	22
TABLA 14. RESULTADOS DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE LOS AEROGENERADORES DEL P.E. NAVARRA 1.....	23
TABLA 15. RESULTADOS ENERGÉTICOS DEL PROYECTO NAVARRA 1.....	23
TABLA 16. RESULTADOS ENERGÉTICOS DEL PROYECTO NAVARRA 1.....	25

	<b>CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1</b>	<b>REFERENCIA</b> R20-56-01-01	<b>REVISIÓN</b> 00
		<b>FECHA</b> 10 de febrero de 2021	<b>Pág.</b> 5 de 25

## 1. INTRODUCCIÓN

La empresa SACYR CONCESIONES RENOVABLES S.L. (en adelante el Cliente) ha encargado a Barlovento la evaluación preliminar del recurso eólico y producción para el parque eólico Navarra 1, ubicado en la Comunidad Foral de Navarra. El emplazamiento se encuentra ubicado en la provincia de Navarra (España), a unos 13 km al noreste de la ciudad de Pamplona.

Las características principales se pueden ver en la siguiente tabla:

<b>Localización (País / Región)</b>	Navarra, España
<b>Proyecto</b>	<b>Navarra 1</b>
<b>Altitud aproximada del emplazamiento (msnm)</b>	987
<b>Número de Aerogeneradores</b>	10
<b>Potencia nominal del aerogenerador (MW)</b>	4.8
<b>Diámetro de rotor (m)</b>	145
<b>Altura de buje (m)</b>	127.5
<b>Potencia total instalada (MW)</b>	48

Tabla 1. Características del P.E. Navarra 1.

El objetivo del estudio es realizar una estimación inicial del nivel de recurso eólico disponible en el emplazamiento, así como evaluar de forma preliminar la producción esperada para el parque eólico planteado. A fin de obtener resultados netos de producción energética, se ha considerado la siguiente configuración:


- 10 aerogeneradores con un diámetro de 145 m, altura de buje de 127.5 m y una potencia nominal de 4.8 MW.

Dado que en el emplazamiento no se tienen datos de viento, para la evaluación se ha contado con un mástil virtual representativo del largo plazo, VORTEX. Este mástil virtual se ha obtenido mediante el modelo meteorológico WRF (Weather Research and Forecasting) y utilizando como datos de entrada los correspondientes al reanálisis ERA5 del centro europeo de predicción (ECMWF).

En un paso posterior estos datos virtuales han sido incorporados al modelo WAsP para realizar una estimación de la velocidad y producción energética en cada punto del emplazamiento.

En los cálculos finales, a nivel de microescala, se ha utilizado la topografía obtenida a partir de modelos digitales del terreno del Centro Nacional de Información Geográfica<sup>1</sup> de resolución 5 m. La Figura 1 muestra las curvas de nivel en intervalos de 10 metros.

<sup>1</sup> <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

	<b>CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1</b>	<b>REFERENCIA</b> R20-56-01-01	<b>REVISIÓN</b> 00
		<b>FECHA</b> 10 de febrero de 2021	<b>Pág.</b> 6 de 25

Los trabajos desarrollados incluyen:

- i) Obtención de las estadísticas de parámetros eólicos relevantes en un punto de la zona (punto de torre virtual). VORTEX MAST (resolución 100 m).
- ii) Evaluación de la densidad del aire en el emplazamiento.
- iii) Simulación del campo de vientos en el emplazamiento mediante los modelos VORTEX y WAsP.
- iv) Cálculo de las producciones brutas y netas esperadas en las diferentes posiciones de aerogenerador.
- v) Cálculo de las pérdidas energéticas debidas a estelas mediante el modelo PARK.

En los siguientes apartados se describen estos trabajos y se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del parque.

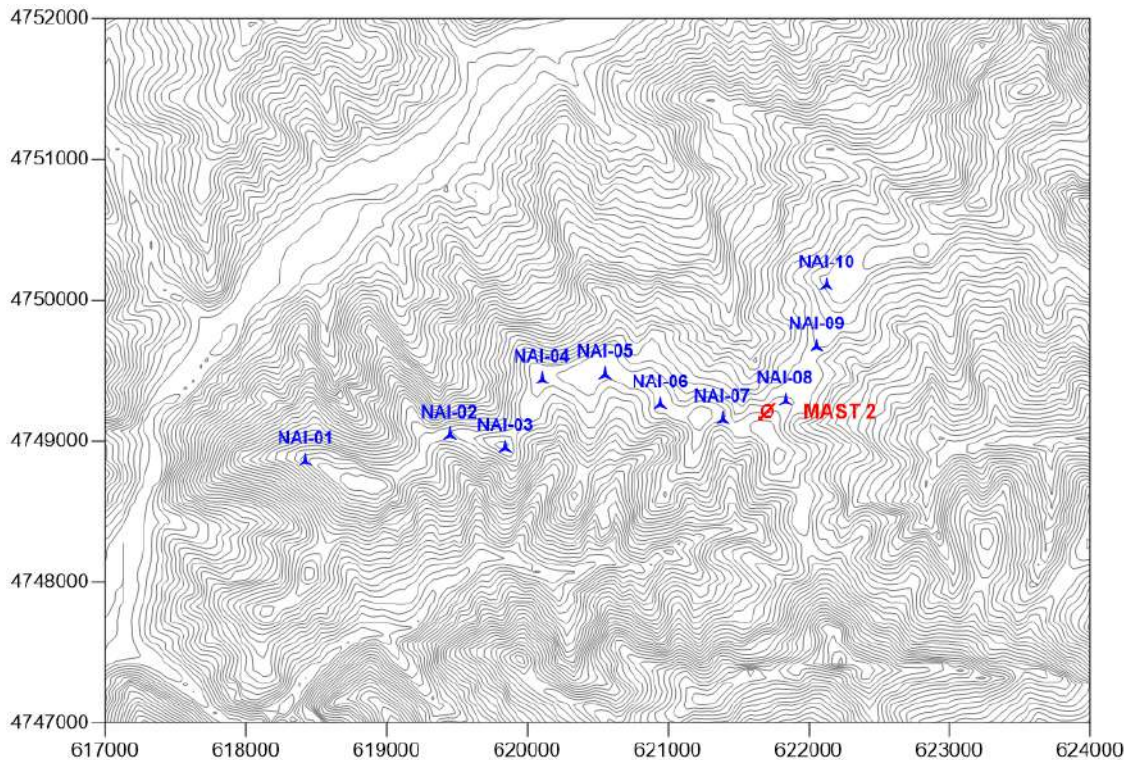


Figura 1 Orografía de la zona, curvas de nivel cada 10 metros.



## 2. DESCRIPCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

La siguiente figura muestra la localización del parque eólico:



Figura 2 Ubicación del P.E. Navarra 1 (Fuente: Google Maps).

### 2.1- OROGRAFÍA Y RUGOSIDAD

En la siguiente tabla se recogen las características de la cartografía digital utilizada en el estudio.

	<b>Orografía</b>	<b>Rugosidad</b>
Tamaño	42 x 34 km <sup>2</sup>	42 x 34 km <sup>2</sup>
Formato	Malla de datos	Líneas de contorno
Fuente de datos	CNIG	Barlovento, a partir de Imágenes de satélite
Resolución	10 m	-
Proyección Geográfica utilizada*	UTM ETRS89, Zona 30T	

\*Esta proyección se utiliza en todos los mapas y planos, de no ser así se indicará.

Tabla 2. Características de la cartografía digital.

Las longitudes de rugosidad utilizadas se encuentran en la siguiente tabla:

<b>Características de la superficie de terreno</b>	<b>Longitud rugosidad (m)</b>
Bosque alto	> 1
Ciudad	1
Bosque	0.8
Barrios residenciales	0.5
Cortavientos	0.3
Muchos árboles y/o arbustos	0.2
Terrenos de cultivo de apariencia cerrada	0.1
Terrenos de cultivo de apariencia abierta	0.05
Terrenos con muy pocos edificios/árboles	0.03
Zonas de aeropuerto con edificios y árboles	0.02
Pistas de rodadura del aeropuerto	0.01
Hierba baja	0.008
Suelo sin vegetación (regular)	0.005
Superficies de nieve (regular)	0.001
Superficies de arena (regular)	0.0003
Áreas de agua (lagos, fiordos, mar)	0.0001

Tabla 3. Longitudes de rugosidad.

La siguiente fotografía aérea muestra la cobertura vegetal del emplazamiento.

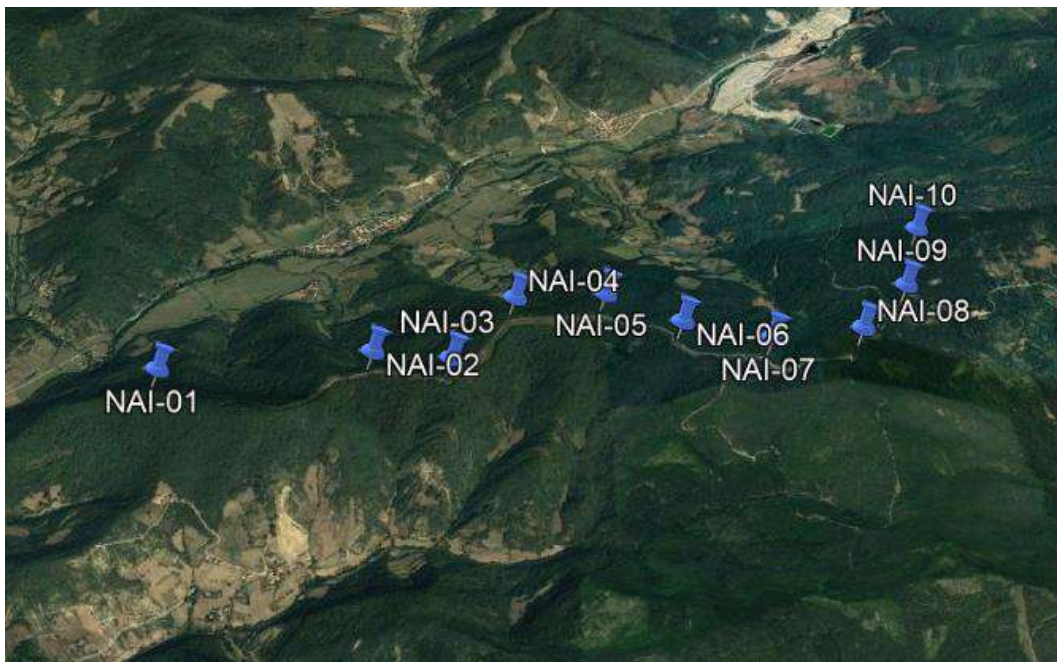



Figura 3 Imagen aérea del proyecto P.E. Navarra 1 y sus parques vecinos, vista desde el sur. (Fuente: Google Earth).


	CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1	REFERENCIA R20-56-01-01	REVISIÓN 00
		FECHA 10 de febrero de 2021	Pág. 9 de 25

## 2.2- CONFIGURACIÓN DE PARQUE

A continuación, se muestran las coordenadas de los aerogeneradores (proporcionadas por el cliente), altitud y la distancia al aerogenerador más cercano.

Aerogenerador	X (m)	Y (m)	Altitud (m)	Aerogenerador más cercano (distancia en diámetros)
NAI-01	618426	4748870	822	NAI-02 - 7.1
NAI-02	619445	4749053	822	NAI-03 - 2.8
NAI-03	619844	4748962	860	NAI-02 - 2.8
NAI-04	620104	4749452	862	NAI-05 - 3.1
NAI-05	620554	4749487	870	NAI-06 - 3.1
NAI-06	620946	4749270	880	NAI-05 - 3.1
NAI-07	621385	4749169	878	NAI-06 - 3.1
NAI-08	621830	4749298	856	NAI-09 - 3.1
NAI-09	622058	4749682	856	NAI-10 - 3.0
NAI-10	622128	4750118	887	NAI-09 - 3.0

Tabla 4. Coordenadas de los aerogeneradores del P.E. Navarra 1.

	<b>CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1</b>	<b>REFERENCIA</b> R20-56-01-01	<b>REVISIÓN</b> 00
		<b>FECHA</b> 10 de febrero de 2021	<b>Pág.</b> 10 de 25

### **3. METODOLOGÍA**

La metodología utilizada para la evaluación de recursos eólicos de la zona se basa en la simulación del campo de vientos mediante modelo meteorológico. La herramienta principal elegida para la modelización es VORTEX.

VORTEX, a través de su producto mástil virtual (MAST), proporciona información meteorológica en un punto seleccionado a varias alturas sobre el nivel del suelo.

El núcleo tecnológico de VORTEX es el modelo atmosférico no lineal WRF (Weather Research and Forecasting model). WRF ha sido desarrollado en colaboración de distintos centros de investigación atmosférica y respaldado por una comunidad científica de más de diez mil usuarios, e incorpora los últimos avances en parametrizaciones físicas. Entre los centros que intervienen en el desarrollo del modelo, destacan el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y the National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

Los modelos meteorológicos de mesoescala necesitan de información meteorológica para la inicialización de la simulación y establecer las condiciones de frontera. Esta información proviene de los modelos meteorológicos globales, que representan la situación general de la atmósfera en un momento dado. En este caso, el modelo se ha inicializado con la base climática global ERA5 (del ECMWF). Dicha base de datos cubre más de 50 años sobre una malla con resolución espacial de aproximadamente 31 km.

Los datos del mástil virtual (MAST), correspondientes a un punto representativo, se extrapolarán al resto del emplazamiento mediante simulación con el modelo WAsP.


#### **3.1- MODELO VORTEX**

El modelo en el que se basa VORTEX es WRF, es un modelo regional, no-hidroestático, que permite resoluciones horizontales de decenas de metros y 60 niveles de presión verticales, distribuidos de manera que la resolución es mayor en las capas más bajas de la atmósfera y disminuye según subimos en altura (presión). Posee la capacidad de asimilar datos de observaciones meteorológicas, incorpora los últimos avances en parametrizaciones físicas e incluye la capacidad de trabajar con anidamientos.

El proceso de cálculo se realiza en varias etapas. En una primera fase, se parte de un área amplia, suficiente para observar fenómenos mesoescalares, y de baja resolución. En pasos posteriores el área de estudio se va reduciendo al área de interés, aumentando la resolución hasta llegar a niveles adecuados para usos energéticos. Este proceso se desarrolla mediante anidamiento, que consiste en incorporar una rejilla con resolución más fina dentro de una rejilla de área superior. Las condiciones de frontera son dadas por la rejilla mayor a la menor. En el caso del modelo WRF los diversos cálculos hasta llegar al último nivel de cálculo se efectúan de forma no lineal.

Los resultados obtenidos, archivo .TAB, tienen una resolución espacial y temporal de 100 m y 1 hora respectivamente, obteniendo una estimación de la velocidad y dirección de viento. El archivo .TAB cubre un periodo de 20 años, y su resultado se considera representativo del largo plazo. La resolución de este archivo se considera suficiente para obtener una estimación preliminar del recurso eólico en el emplazamiento.



	<b>CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1</b>	REFERENCIA R20-56-01-01	REVISIÓN 00
		FECHA 10 de febrero de 2021	Pág. 11 de 25

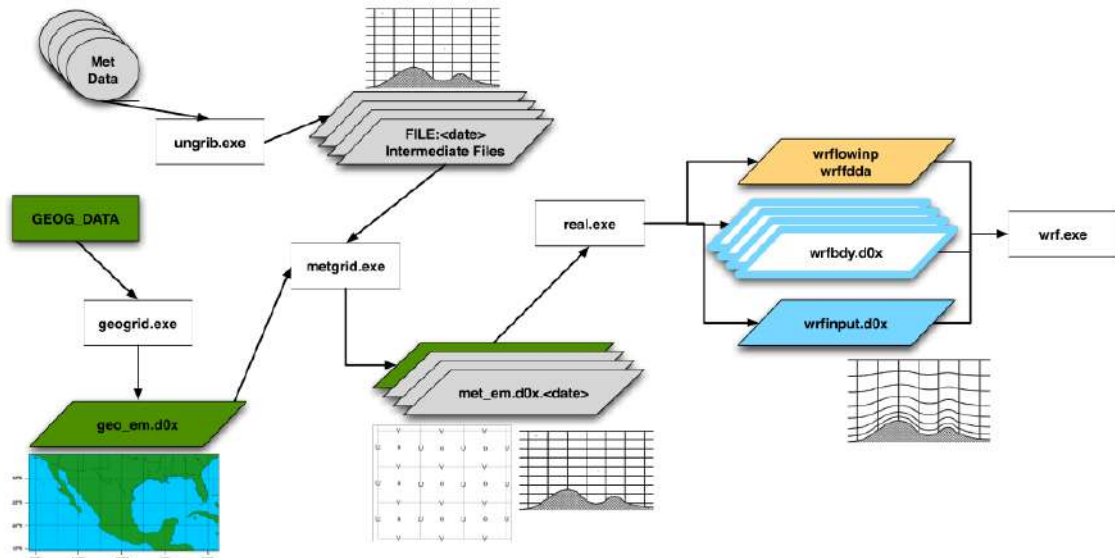


Figura 4 Uso de datos del modelo WRF (Fuente: NCAR).

### 3.2- MODELO DE MICROESCALA, WAsP

En esta etapa, se estima el recurso eólico en el emplazamiento a partir de los datos del mástil virtual. La resolución se incrementa hasta un valor suficiente para la evaluación de recursos de un parque eólico. Esta resolución está limitada por la de los datos virtuales disponibles, en este caso 100 m. El modelo de microescala calcula la variación del viento debida a los efectos de la topografía local y de la rugosidad del terreno.

En este proceso se ha utilizado el mástil virtual obtenido por medio de modelización a nivel microescalar de Vortex. Como resultado directo se obtiene la distribución de frecuencia de velocidad de viento por cada uno de los 16 sectores de dirección considerados en la posición del nodo de inicialización del modelo (en adelante torre virtual, NODO o MAST).

La posición de la torre virtual ha sido definida por Barlovento con la intención de que ésta sea representativa de las posiciones de aerogenerador que tienen una mejor exposición al flujo libre de viento en la zona, teniendo en cuenta la rosa de viento esperada, así como las características orográficas y pendientes de la zona. La siguiente figura, muestra la posición del mástil virtual y una vista 3D del emplazamiento.

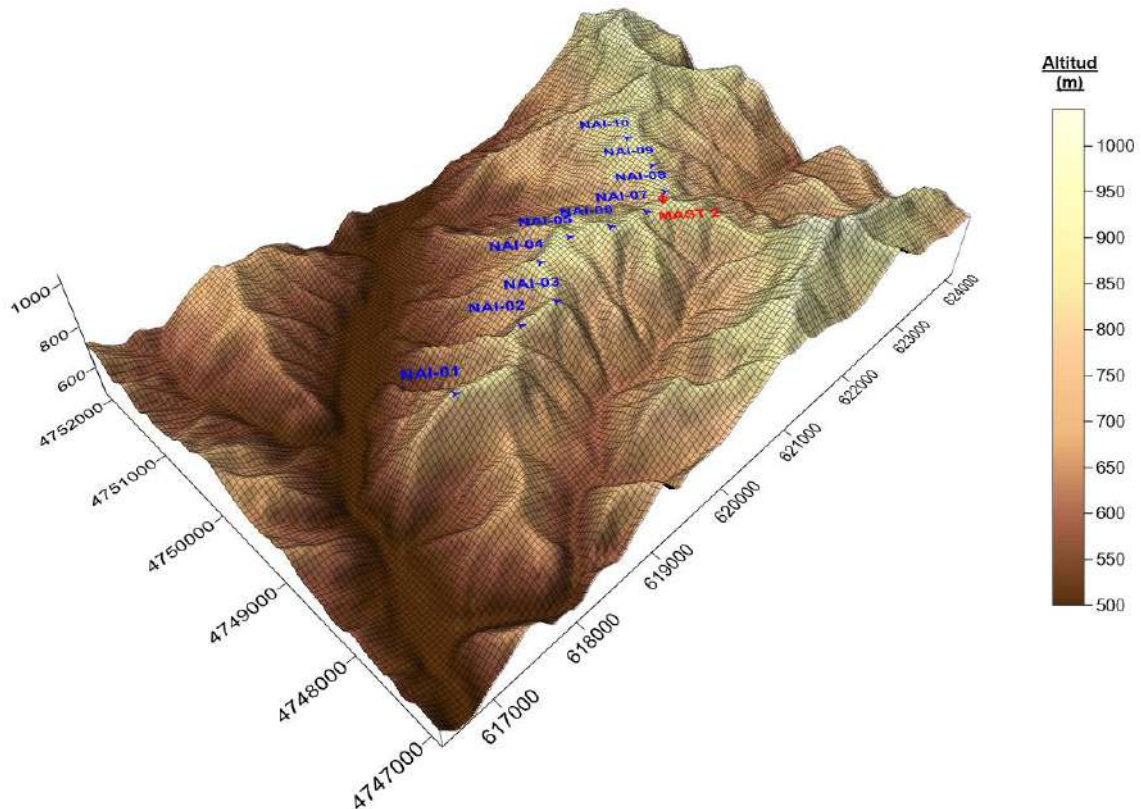


Figura 5 Altimetría y posición del nodo de inicialización o mástil virtual.


Para obtener un campo de vientos detallado del emplazamiento, se ha utilizado el modelo WAsP, utilizando como datos de entrada los proporcionados por los mástiles virtuales. Este modelo ha sido elaborado por la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU), con él se ha elaborado el Atlas Eólico Europeo, varios Atlas Eólicos nacionales y regionales, así como la evaluación de numerosos parques eólicos.

Como resultado de la simulación se han obtenido los valores de:

- Velocidades a la altura de buje de los aerogeneradores.
- Rosas de frecuencias y de energías.
- Distribuciones de velocidades.
- Perfil vertical de viento.

Asimismo, utilizando la curva de potencia del aerogenerador, el modelo realiza el cálculo de la producción bruta y neta una vez descontadas las pérdidas por estelas.

Las pérdidas por estelas se han calculado mediante el modelo **PARK**, elaborado asimismo por DTU, es un modelo de cálculo de pérdidas de producción debidas a *sombras* entre aerogeneradores. El modelo PARK está integrado en la versión 11.6 de WAsP. Esta versión del programa PARK permite calcular las pérdidas de producción entre aerogeneradores del parque.

	<b>CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1</b>	<b>REFERENCIA</b> R20-56-01-01	<b>REVISIÓN</b> 00
		<b>FECHA</b> 10 de febrero de 2021	<b>Pág.</b> 13 de 25

Dado que los datos de entrada corresponden a un periodo representativo del largo plazo, los resultados de producción obtenidos son, asimismo, valores representativos a largo plazo.

### **3.3- DATOS GEOFÍSICOS**

Los datos de orografía y rugosidad requeridos por los modelos de meso y microescala deben ser facilitados a los modelos. En la Tabla 2 se especifican las diferentes fuentes de datos utilizadas.

Los valores de rugosidad superficial se han asignado a partir de la vegetación existente en la zona de estudio.

La Figura 5 muestra el mapa de altimetría generado a partir del modelo digital de terreno del CNIG de resolución 5 m.

#### 4. ESTADÍSTICAS PRINCIPALES DEL RÉGIMEN DE VIENTO

En este apartado se describen brevemente las principales estadísticas del régimen de viento, estimado a partir del proceso anteriormente explicado, en la posición del mástil virtual a una altura de 120 m sobre el nivel del suelo.

##### 4.1- VORTEX - MAST VIRTUAL

Para la evaluación del recurso eólico de la zona no se dispone de datos medidos por una torre meteorológica. Barlovento ha definido un punto de torre virtual de largo plazo de resolución 100 m, centrado en el siguiente punto (ver Figura 5).

Torre virtual	X (m)	Y (m)	Altitud (m)
MAST 2	621709	4749208	862

Tabla 5. Punto de torre virtual.

##### 4.2- ESTADÍSTICAS MAST 2

Las siguientes tablas y figuras muestran un resumen estadístico de los principales parámetros del viento.

#### MAST 2

	120 m
<b>Velocidad media (m/s)</b>	7.96
<b>Potencia Media(W/m<sup>2</sup>) (ρ=1.225 kg/m<sup>3</sup>)</b>	507
<b>Weibull A(m/s), k</b>	A=9.1, k=2.53
<b>Perfil Vertical Medio [α]</b>	0.21

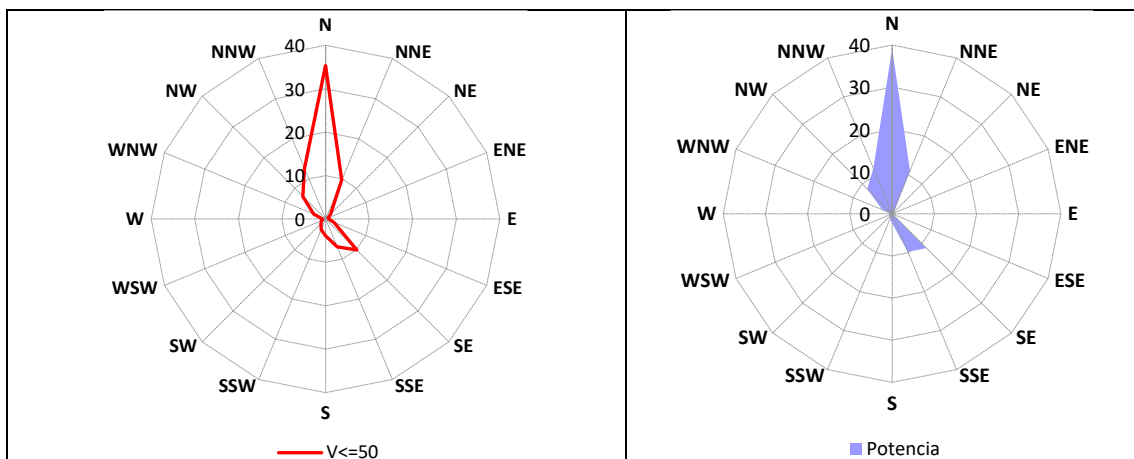


Figura 6 Distribución de frecuencia y contenido energético de dirección de viento en % en el mástil virtual MAST 2.



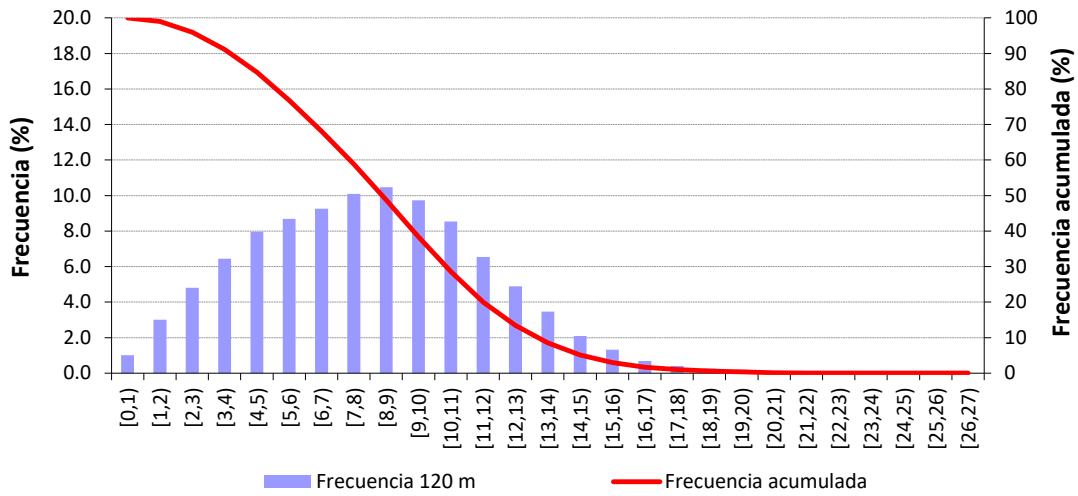


Figura 7 Distribución de velocidades a 120 metros en el mástil virtual MAST 2.

Sector	Frecuencia [%]	Velocidad [m/s]	Potencia [W/m <sup>2</sup> ]
N	35.3	8.87	562
NNE	9.7	8.75	576
NE	1.7	5.44	205
ENE	0.7	2.26	15
E	0.8	2.64	18
ESE	2.2	3.85	45
SE	10.2	7.90	572
SSE	7.0	8.78	707
S	3.9	6.02	295
SSW	2.6	5.92	249
SW	1.5	6.47	268
WSW	1.0	6.39	400
W	0.7	2.99	28
WNW	2.9	7.69	443
NW	7.3	8.29	578
NNW	12.6	7.57	468
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>7.96</b>	<b>507</b>

Tabla 6. Distribución sectorial de dirección y velocidad de viento en el mástil virtual MAST 2.

### 4.3- EVALUACIÓN DEL PERFIL VERTICAL

El perfil vertical del viento se calcula asumiendo que la velocidad del viento cambia con la altura siguiendo una ley potencial a partir de la siguiente ecuación:

$$V_2/V_1 = (h_2/h_1)^\alpha$$

Donde:

- $V_2$  = velocidad del viento en el nivel 2
- $V_1$  = velocidad del viento en el nivel 1
- $h_2$  = altura del nivel 2
- $h_1$  = altura del nivel 1
- $\alpha$  = exponente de la ley potencial

Puesto que no se dispone de medidas en el emplazamiento, el valor de perfil vertical se ha derivado de la velocidad estimada por el modelo WAsP, partiendo del mástil virtual a largo plazo a diferentes alturas. En la siguiente figura pueden verse los resultados:

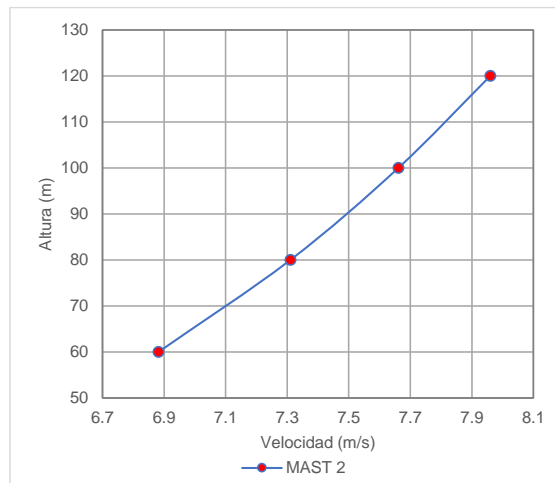



Figura 8 Variación de la velocidad con la altura en el mástil virtual.

La siguiente tabla muestra el perfil vertical medio aceptado obtenido por WAsP a diferentes alturas.

Torre	Perfil medio aceptado ( $\alpha$ )
MAST 2	0.21

Tabla 7. Perfil vertical aceptado en el emplazamiento.

El perfil vertical debe ser ratificado cuando se disponga de medidas del mástil meteorológico instalado en el emplazamiento.

	CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1	REFERENCIA R20-56-01-01	REVISIÓN 00
		FECHA 10 de febrero de 2021	Pág. 17 de 25

## 5. EVALUACIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE

La tabla siguiente muestra los datos usados como referencia para la evaluación de la densidad del aire.

Variables	Origen de los datos (Pamplona Aeropuerto)	Altitud del sensor (m)	Distancia al emplazamiento (km)	Periodo considerado (años)
Temperatura	AEMET	-	15	29
Presión	OGIMET			

Tabla 8. Fuente de datos para el cálculo de la densidad del aire.

Se considera que los datos son adecuados para llevar a cabo el cálculo de la densidad del aire con un margen de error aceptable.

La extrapolación de la densidad del aire desde los datos de referencia de la tabla anterior hasta la altura de buje se ha realizado usando un modelo hidrostático de atmósfera.

La siguiente tabla muestra el cálculo de la densidad para el P.E. Navarra 1:

Mes	Datos de referencia (ver Tabla 8)		Media del P.E. Navarra 1 a altura de buje (859 m + 127.5 m de altura de buje media)		
	Presión (mb)	Temperatura (°C)	Presión (mb)	Temperatura (°C)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Enero	965.0	5.2	903.9	1.8	1.14
Febrero	962.1	6.3	901.4	2.9	1.14
Marzo	962.7	9.1	902.6	5.7	1.12
Abril	959.7	10.9	900.1	7.5	1.11
Mayo	960.6	14.7	901.8	11.3	1.10
Junio	962.7	18.6	904.5	15.2	1.09
Julio	963.4	21.2	905.7	17.8	1.08
Agosto	963.2	21.4	905.5	18.0	1.08
Septiembre	964.3	18.2	905.9	14.8	1.09
Octubre	962.7	14.1	903.6	10.7	1.11
Noviembre	964.0	9.0	903.8	5.6	1.13
Diciembre	963.8	6.0	903.0	2.6	1.14
<b>ANUAL</b>	<b>962.9</b>	<b>12.9</b>	<b>903.5</b>	<b>9.5</b>	<b>1.11</b>

Tabla 9. Temperatura, presión, humedad y densidad del aire del P.E. Navarra 1.

Se concluye que la densidad media del emplazamiento en el P.E. Navarra 1 es 1.11 kg/m<sup>3</sup> con altitud media (859 m) + altura de buje (127.5 m).

Se considera que el periodo de datos usado garantiza que los valores obtenidos serán representativos a largo plazo.

## 6. AEROGENERADOR

La tabla siguiente muestra las principales características del aerogenerador a instalar.

<b>Vin-Vout (m/s)</b>	3 - 27
<b>Potencia Nominal (MW)</b>	4.8
<b>Altura Buje (m)</b>	127.5
<b>Diámetro del rotor (m)</b>	145

Tabla 10. Aerogenerador.

En la siguiente tabla y figura se muestran la curva de potencia para el aerogenerador considerado a la densidad del emplazamiento (ver Tabla 9).

Velocidad (m/s)	Potencia (kW)	Ct
3.0	46	0.895
3.5	112	0.867
4.0	212	0.844
4.5	340	0.829
5.0	497	0.820
5.5	684	0.817
6.0	908	0.818
6.5	1172	0.819
7.0	1478	0.819
7.5	1830	0.817
8.0	2226	0.808
8.5	2655	0.786
9.0	3102	0.751
9.5	3545	0.705
10.0	3962	0.652
10.5	4326	0.594
11.0	4614	0.533
11.5	4800	0.473
12.0	4800	0.416
12.5	4800	0.366
13.0	4800	0.322
13.5	4800	0.285
14.0	4800	0.253
14.5	4800	0.226
15.0	4800	0.203
15.5	4800	0.183
16.0	4800	0.166
16.5	4800	0.151
17.0	4800	0.138
17.5	4800	0.126
18.0	4800	0.116
18.5	4800	0.107
19.0	4800	0.099
19.5	4800	0.091
20.0	4800	0.084
20.5	4800	0.078
21.0	4800	0.072
21.5	4800	0.067
22.0	4720	0.062
22.5	4628	0.057
23.0	4531	0.053
23.5	4432	0.049
24.0	4337	0.045
24.5	4247	0.042
25.0	4168	0.039
25.5	4096	0.037
26.0	4031	0.035
26.5	3977	0.033
27.0	3930	0.031

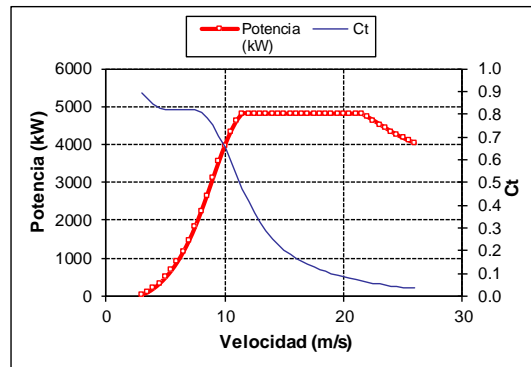



Tabla 11. Curva de potencia del aerogenerador para la densidad 1.11 kg/m<sup>3</sup>.

	CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1	REFERENCIA R20-56-01-01	REVISIÓN 00
		FECHA 10 de febrero de 2021	Pág. 19 de 25

## 7. MODELIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE PRODUCCIONES

A fin de evaluar los resultados energéticos del parque eólico, se han utilizado técnicas de modelización.

El proceso ha sido el siguiente:

- Se ha calculado el mástil virtual VORTEX-MAST en un punto representativo del emplazamiento. Estos resultados se han obtenido con el modelo WRF, partiendo inicialmente de una simulación de resolución mesoescalar y refinando mediante anidamiento hasta una resolución de 100 m.
- A partir de los resultados a microescala obtenidos por VORTEX (MAST) en un punto a 120 m de altura de medida, y mediante la utilización del modelo WAsP, se obtienen los resultados de velocidad y producción en las diferentes posiciones del emplazamiento, con una resolución de 100 metros.
- Utilizando el modelo PARK se han evaluado las pérdidas de producción debidas a las estelas entre aerogeneradores del mismo parque.
- Finalmente se han calculado las producciones netas a largo plazo del parque eólico propuesto.

### 7.1- **DATOS DE ENTRADA UTILIZADOS**

Como datos de entrada de los modelos se han utilizado los siguientes:

#### 7.1.1.-Orografía

En los cálculos finales se ha utilizado topografía obtenida a partir del modelo digital de CNIG<sup>2</sup> de resolución 5 m.


#### 7.1.2.-Rugosidad superficial

Para evaluar la rugosidad del terreno, se ha recurrido a imágenes satelitales de Google Earth, ver 2.1-.

#### 7.1.3.-Datos de viento

Para la evaluación energética del proyecto se han utilizado los datos de viento del mástil virtual (MAST 2, resolución 100 m), que sirven de entrada al modelo WAsP. Estos datos de entrada corresponden a un periodo representativo del largo plazo. Mediante este modelo se obtienen los resultados de velocidad y producción en las posiciones de aerogenerador.

<sup>2</sup> <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

	CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1	REFERENCIA R20-56-01-01	REVISIÓN 00
		FECHA 10 de febrero de 2021	Pág. 20 de 25

Como datos de viento se han utilizado aquellos que los centros meteorológicos recogen y analizan con periodicidad horaria (datos de las estaciones meteorológicas de superficie, radiosondeos, barcos, aviones, radares y satélites). A partir de estos datos, los centros meteorológicos elaboran el reanálisis, que representa la situación general de la atmósfera en un momento dado. Estos centros cuentan con varios decenios de series de datos de reanálisis en todo el volumen de la atmósfera (tridimensionales) de calidad controlada, que cubren todo el globo.

Vortex adapta estos datos climáticos globales a los efectos locales del terreno, y genera mapas eólicos a mesoescala y resultados a microescala (Mástil virtual).

A continuación, se muestra la distribución de viento empleada como entrada para el modelo WAsP a 120 metros de altura.

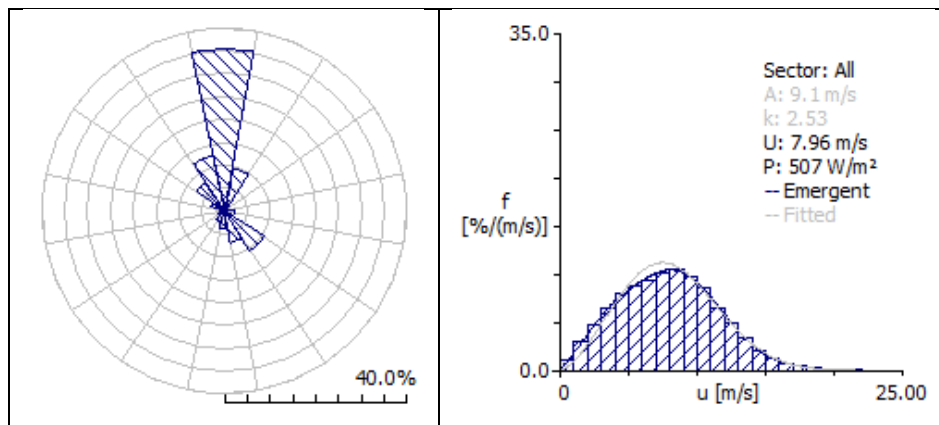


Figura 9 Datos de entrada para el modelo WAsP a 120 metros en el mástil virtual MAST 2.

#### 7.1.4.-Densidad del aire y curva de potencia

La densidad media estimada del aire en el emplazamiento Navarra 1, a su correspondiente altura media sobre el nivel del mar más la altura de buje de 127.5 m, es de  $\rho = 1.11 \text{ kg/m}^3$ .

Para el cálculo energético se ha utilizado la curva de potencia de un aerogenerador, a la densidad media estimada en el emplazamiento (ver Apartados 5 y 6).

## 7.2- MODELOS UTILIZADOS

Los modelos utilizados en el presente estudio son VORTEX y WAsP v11.6.

**VORTEX** es un modelo de campo de vientos elaborado por la compañía VORTEX.

**WAsP** es un modelo de evaluación del campo de vientos elaborado por la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU), con el que se han elaborado el Atlas Eólico Europeo, varios Atlas Eólicos nacionales y regionales, y se han evaluado numerosos parques eólicos.

**PARK**, elaborado asimismo por DTU, es un modelo de cálculo de pérdidas de producción debidas a sombras entre aerogeneradores. El modelo PARK está integrado en la versión 11.6 de WAsP. Esta versión del programa PARK permite calcular las pérdidas de producción entre aerogeneradores de distinto modelo.

### 7.3- EVALUACIÓN DE LA ZONA

Mediante el proceso descrito en apartados anteriores se obtienen los resultados de velocidad en los diferentes puntos del emplazamiento. Las características de este cálculo se muestran a continuación.

Altura de los resultados (m)	Dimensiones X-Y(km)	Resolución de la malla (m)
120	7x5	50

Tabla 12. Características de la zona evaluada.

En la siguiente figura se muestra el mapa de isoventas del emplazamiento a 120 m de altura de buje, calculado con el mástil virtual:

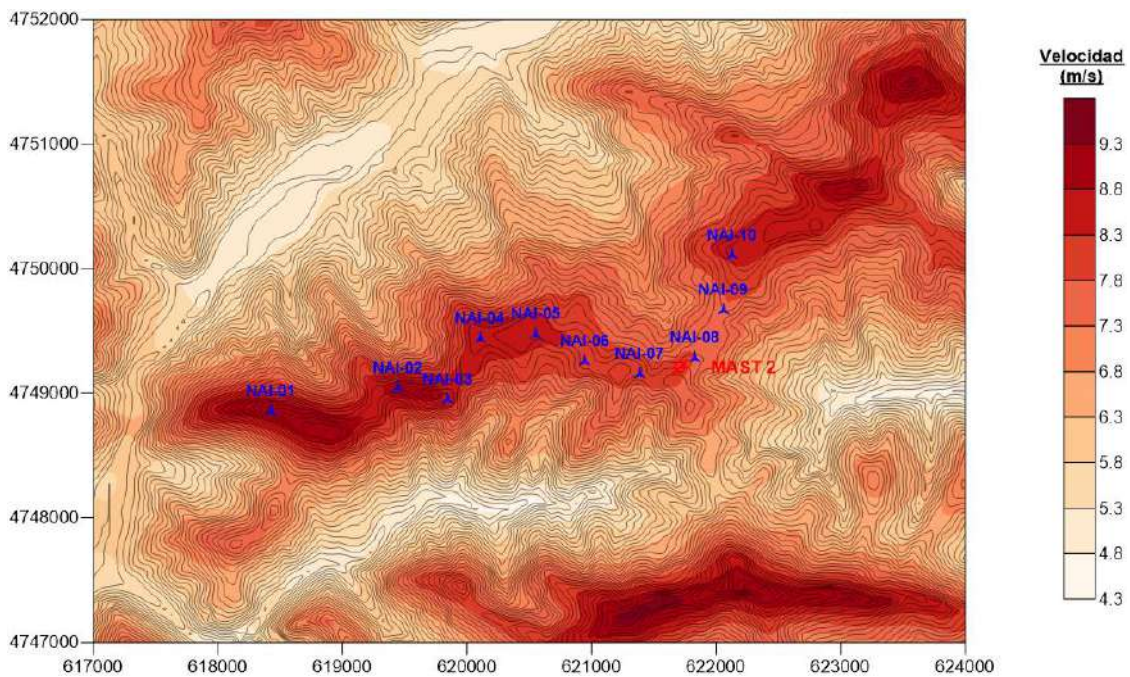



Figura 10 Campo de vientos en el emplazamiento a 120 m utilizando el mástil virtual.



	CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1	REFERENCIA R20-56-01-01	REVISIÓN 00
		FECHA 10 de febrero de 2021	Pág. 22 de 25

## 7.4- EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA

### 7.4.1.-Pérdidas técnicas y operacionales

Para la opción de parque propuesta (posiciones, modelo de aerogenerador y altura de buje) se ha realizado la evaluación de las producciones brutas. Al valor de producción obtenido en la simulación habrá que descontar las pérdidas debidas a diferentes factores durante el funcionamiento de un parque eólico. La tabla siguiente resume los factores que han sido aplicados para ajustar la producción bruta de un parque eólico en funcionamiento conectado a la red eléctrica.


Estas pérdidas son orientativas y deberán evaluarse con exactitud en la evaluación final de producción, una vez efectuada la campaña de medidas. En este sentido, hay que señalar que no se han considerado las estelas de parques vecinos en el cálculo de la producción. Teniendo en cuenta el tamaño del conjunto de proyectos, cuando se disponga de medidas en el emplazamiento, las pérdidas por estelas se deberán recalcular teniendo en cuenta el efecto de parque grande y efecto bloqueo del viento.

Los factores de corrección y pérdidas de producción esperadas se resumen en la siguiente tabla:

Concepto	Factor	Comentario
Disponibilidad de aerogenerador	0.970	Valor medio considerado en parques actuales.
Disponibilidad de parque	0.990	Objetivo a conseguir.
Incumplimiento de la curva de potencia	0.970	El fabricante debe aplicar las medidas necesarias para garantizar el cumplimiento de la curva potencia.
Suciedad y degradación de las palas	0.995	Estimación Barlovento.
Temperaturas altas	1	Estimación Barlovento.
Temperaturas bajas y heladas	1	Estimación Barlovento
Histéresis por vientos altos	-	No evaluado. Sin datos reales en el emplazamiento
Estrategia de paradas por sectores (WSM)	-	No evaluado. Fuera del alcance del estudio de producción.
Estrategia de paradas por ruido	-	No evaluado. Fuera del alcance del estudio de producción.
Pérdidas eléctricas	0.970	Objetivo a conseguir.
Regulación del sistema eléctrico	-	No evaluado. Fuera del alcance del estudio de producción.
Otras limitaciones de producción	-	No evaluadas. Fuera del alcance del estudio de producción.
<b>TOTAL</b>	<b>0.899</b>	<b>Obtenido multiplicando los factores anteriores</b>

Tabla 13. Factores de corrección y pérdidas de producción esperadas.



	<b>CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1</b>	REFERENCIA R20-56-01-01	REVISIÓN 00
		FECHA 10 de febrero de 2021	Pág. 23 de 25

#### 7.4.2.-Evaluación de producción energética

En la tabla siguiente se muestran los resultados del modelo de campo de viento (velocidad y producción) y los resultados finales de producción para la configuración analizada del proyecto.


Aero	X (m)	Y (m)	Velocidad del viento (m/s)	Producción bruta (MWh/año)	Pérdidas por estelas del parque eólico (%)	Producción bruta incluyendo estelas (MWh/año)
NAI-01	618426	4748870	9.15	23840	1.0	23597
NAI-02	619445	4749053	9.04	23730	0.9	23523
NAI-03	619844	4748962	8.74	22873	3.7	22041
NAI-04	620104	4749452	8.69	22744	1.4	22419
NAI-05	620554	4749487	8.58	22360	1.9	21946
NAI-06	620946	4749270	8.26	21207	2.1	20768
NAI-07	621385	4749169	8.10	20730	1.9	20332
NAI-08	621830	4749298	7.91	19843	6.0	18647
NAI-09	622058	4749682	7.83	19341	9.3	17535
NAI-10	622128	4750118	8.56	22211	2.2	21720
<b>TOTAL</b>			<b>8.48</b>	<b>218879</b>	<b>2.9</b>	<b>212527</b>

Tabla 14. Resultados de la producción energética de los aerogeneradores del P.E. Navarra 1.

Los resultados de producción estimada para la propuesta del parque pueden verse a continuación:

Parque eólico	P.E. Navarra 1
<b>Nº de aerogeneradores</b>	10
<b>Altura de buje (m)</b>	127.5
<b>Diámetro del rotor (m)</b>	145
<b>Potencia unitaria (MW)</b>	4.8
<b>Potencia total (MW)</b>	48
<b>Área del parque (m<sup>2</sup>)</b>	165130
<b>Producción bruta teórica (MWh/año)</b>	218879
<b>Pérdida por estelas (%)</b>	2.9
<b>Pérdidas técnicas y operacionales (%)</b>	10.1
<b>Producción Neta (MWh/año)</b>	191068
<b>Densidad de producción (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	1157
<b>Horas equivalentes (en subestación)</b>	3981

Tabla 15. Resultados energéticos del proyecto Navarra 1.

	CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1	REFERENCIA R20-56-01-01	REVISIÓN 00
		FECHA 10 de febrero de 2021	Pág. 24 de 25

## 8. CONCLUSIONES

En el presente informe se presentan los resultados de la evaluación preliminar de potencial eólico para el P.E. Navarra 1, ubicado en la Comunidad Foral de Navarra. El emplazamiento se encuentra ubicado a unos 13 km al noreste de la ciudad de Pamplona en Navarra.

Dado que en el emplazamiento no se tienen datos de viento, para la evaluación se ha contado con un mástil virtual representativo del largo plazo, VORTEX-MAST. Dicho mástil tiene una resolución espacial de 100 m y los resultados se consideran representativos de largo plazo (ver apartado 3.1-).

Los resultados finales de producción se han calculado para la configuración definida del proyecto:

- 10 aerogeneradores con un diámetro de 145 m, altura de buje de 127.5 m y una potencia nominal de 4.8 MW.


La metodología utilizada para la evaluación de recursos eólicos en el parque se basa en la modelización del campo de vientos en dos fases. En la primera fase, se obtiene un mástil virtual MAST con resolución 100 m y representativo del largo plazo. Este resultado sirve como entrada para la siguiente fase, en la que mediante el modelo WAsP se obtienen los resultados de velocidad y producción en cada posición de parque.

La densidad estimada del emplazamiento en el P.E. Navarra 1 es 1.11 kg/m<sup>3</sup> con altitud media (859 m) + altura de buje (127.5 m).

Para los cálculos energéticos se ha considerado la curva de potencia del aerogenerador a la densidad del emplazamiento.

La velocidad media del emplazamiento a la altura de buje (127.5 m) es de 8.5 m/s.

Las pérdidas por estelas suponen un 2.9% del total de la energía producida por el parque. Cuando se disponga de medidas en el emplazamiento, las pérdidas por estelas se deberán recalcular teniendo en cuenta el efecto de parque grande y efecto bloqueo del viento.

	<b>CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RECURSO EÓLICO PARA P.E. NAVARRA 1</b>	<b>REFERENCIA</b> R20-56-01-01	<b>REVISIÓN</b> 00
		<b>FECHA</b> 10 de febrero de 2021	<b>Pág.</b> 25 de 25

La tabla siguiente muestra un resumen de los resultados energéticos del P.E. Navarra 1 una vez aplicadas las pérdidas consideradas:

<b>Parque eólico</b>	<b>P.E. Navarra 1</b>
<b>Nº de aerogeneradores</b>	10
<b>Altura de buje (m)</b>	127.5
<b>Diámetro del rotor (m)</b>	145
<b>Potencia unitaria (MW)</b>	4.8
<b>Potencia total (MW)</b>	48
<b>Área del parque (m<sup>2</sup>)</b>	165130
<b>Producción bruta teórica (MWh/año)</b>	218879
<b>Pérdida por estelas (%)</b>	2.9
<b>Pérdidas técnicas y operacionales (%)</b>	10.1
<b>Producción Neta (MWh/año)</b>	191068
<b>Densidad de producción (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	1157
<b>Horas equivalentes (en subestación)</b>	3981

Tabla 16. Resultados energéticos del proyecto Navarra 1.

